

تولید صنعتی بیودیزل از زیست توده به عنوان یک منبع تجدیدپذیر

مژده نیک پور^۱، محمد بازوکی^{۲*}

^۱کارشناسی ارشد مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر، پژوهشکده محیط‌زیست، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران

^۲دانشیار مهندسی بیوتکنولوژی، پژوهشکده محیط‌زیست، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران

دریافت: ۹۴/۲/۳ پذیرش: ۹۴/۱۱/۱۸

چکیده

در حال حاضر، تولید صنعتی نسل اول سوخت‌های زیستی (بیودیزل، بیواتانول و بیوگاز) به میزان بهینه ای رسیده است. تولید سوخت از منابع باکیفیت پایین (نسل دوم سوخت‌های زیستی)، راه پایداری برای تامین سوخت و انرژی در بخش‌های صنعتی محسوب می‌شود. سالانه در ایران بیش از ۱۵ میلیون تن ضایعات کشاورزی تولید می‌شود، در حالی که فقط ۰.۷ درصد از مصرف انرژی سالانه ایران از زیست توده تولید می‌گردد. در این مقاله روش فیشر- تروپش به عنوان راهی برای تولید بیودیزل از زیست توده مورد بررسی قرار گرفته است. قیمت نهایی هر لیتر محصول بیودیزل بین ۲۳۰۰۰ تا ۴۰۰۰۰ ریال تخمین زده شده که با بهینه سازی فرآیند یا ترکیب کارخانه های زغال سنگ و زیست توده، کاهش خواهد یافت. همچنین، با کاهش میزان انتشار دی اکسید کربن، این فرآیند به روشی سازگار با محیط زیست تبدیل خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: بیودیزل، فیشر- تروپش، زیست توده، انرژی تجدیدپذیر، گاز سنتز

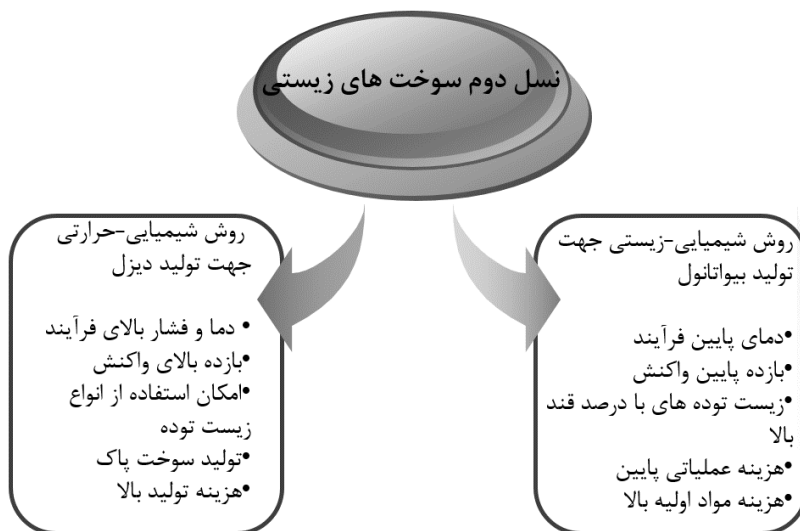
مقدمه

برای تأمین نیاز انرژی جهان در آینده می‌بایست واحدهای تولیدکننده سوخت‌های زیستی موجود به صورت کامل از ظرفیت‌های خود با حداکثر بازده استفاده کنند، که حتی در این صورت نیز بر اساس برآوردهای صورت گرفته باز هم پاسخگوی تقاضای بازار در آینده نخواهد بود. بر اساس آمار منتشر شده از سوی آژانس انرژی تا سال ۲۰۳۵ میزان جهانی مصرف انرژی ۳۳ درصد افزایش خواهد یافت و پیش بینی شده که میزان ۴۰ درصد این رشد از منابع تجدیدپذیر تامین خواهد شد [۱].

بهترین راه تولید سوخت از زیست توده به عنوان یک منبع انرژی تجدیدپذیر، تبدیل آن از طریق گازسازی (زیر شاخه نسل دوم تولید سوخت‌های زیستی) است (شکل ۱). در میان محصولات تولیدشده از گاز سنتز، دیزل فیشر- تروپش بیشترین پتانسیل صنعتی شدن را دارا می‌باشد؛ زیرا راندمان فرآیند بالا بوده و این که

*mpazouki@merc.ac.ir

می‌توان سیستم را با واحد تبدیل زغال‌سنگ به سوخت ترکیب نمود. این اقدام باعث کاهش هزینه نهایی سوخت و کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی می‌شود [۲]. در مرحله گازسازی مشاهده شده است که چوب می‌تواند گاز سنتز نسبتاً خالصی تولید نماید که نکته حائز اهمیت برای کار در مقیاس صنعتی است؛ زیرا دیگر نیازی به مراحل تصفیه پیچیده در مراحل بعدی نیست. همین نکته نشان‌دهنده اهمیت استفاده از ضایعات چوب به‌عنوان یک منبع تجدید پذیر تولید سوخت از زیست‌توده را روشن است.

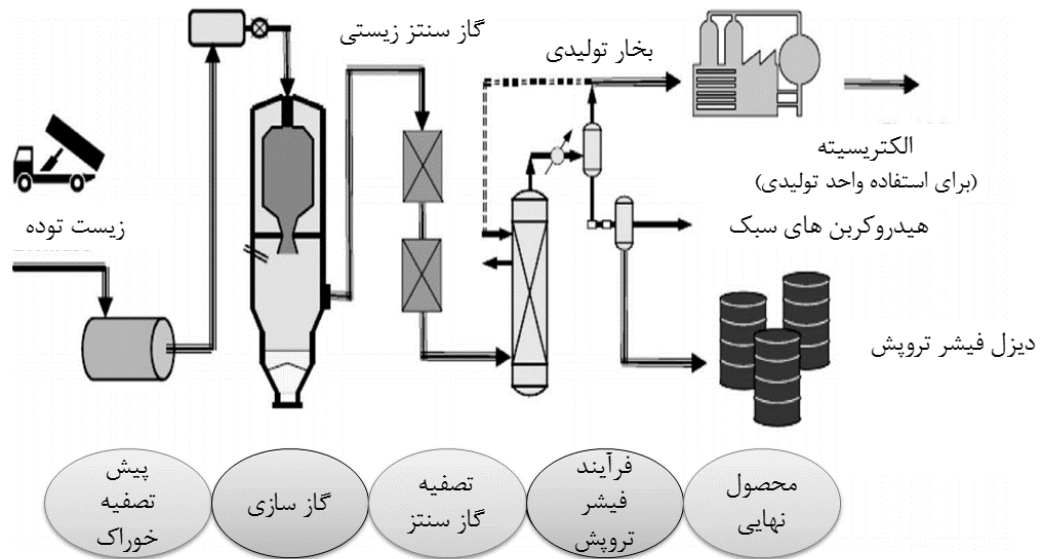


شکل ۱. نسل دوم سوخت‌های زیستی

فرآیند فیشر- تروپش که به دنبال فرآیند گازسازی صورت می‌گیرد منجر به تولید دیزل به‌عنوان محصول نهایی خواهد شد، این سوخت بدون تغییر در ساختار موتور مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳]. در حالی که در روش‌های دیگر مثلاً فرآیند پیرولیز (دما حدود ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد) محصول نهایی نسبت به نفت خام دارای ویسکوزیته بالاتر و محتوای انرژی کم‌تر بوده و استفاده مستقیم آن در موتورهای گازوئیلی و دیزلی به دلایل فنی و بحث خوردگی امکان‌پذیر نیست.

فرآیند سنتز دیزل فیشر تروپش

سنتز فیشر- تروپش در سال ۱۹۲۳ توسط دانشمندان آلمانی فیشر و تروپش کشف شد. در این روش هیدروکربن‌ها از گاز سنتز که مخلوطی از گازهای مونواکسید کربن و هیدروژن است تولید می‌شود. به عبارت دیگر گاز تولیدی از مرحله گازسازی به هیدروکربن‌های تازه تبدیل شده و پس از آن عملیات خالص‌سازی روی سوخت تولیدی صورت می‌گیرد. فرآیند فیشر- تروپش دلیل تولید هیدروکربن‌های فوق‌العاده تمیز به‌واسطه ماهیت فرآیند سنتز دیزل (بدون ترکیبات گوگردی و آروماتیک) نسبت به سایر روش‌ها ارجحیت دارد [۴].



شکل ۲. شمای کلی فرآیند تولید سوخت مایع از زیست توده با استفاده از روش فیشر- تروپش [۵]

تولید دیزل به روش فیشر- تروپش شامل چهار مرحله اصلی: (۱) آماده سازی زیست توده، (۲) گاز سازی- تبدیل زیست توده لیگنوسلولوزیک به گاز خام، (۳) تصفیه و آماده سازی گاز سنتز، (۴) فرآیند فیشر- تروپش و مرحله فرعی تصفیه نهایی محصول به طوری که مطابق با استانداردهای سوخت های موجود باشد (شکل ۲).

روش های آماده سازی و نحوه خوراک دهی زیست توده

از آن جایی که حدود ۷۰-۹۰ درصد زیست توده های در دسترس مورد استفاده در جهان را چوب و کاه تشکیل می دهد، بیش تر بحث روی این نوع زیست توده ها به عنوان منبع تجدید پذیر تولید سوخت صورت می گیرد. مسئله مهم در مورد زیست توده مورد استفاده چگالی انرژی آن است که هرچه مقدارش بیش تر باشد میزان انرژی تولیدی به ازای واحد حجم آن بیش تر خواهد بود. به عنوان مثال کم بودن چگالی انرژی کاه منجر به افزایش هزینه حمل و نقل شده، در نتیجه می بایست توسط روش هایی نظیر پیرولیز سریع، چگالی انرژی آن را افزایش داد. حتی چوب که دارای چگالی انرژی بالاتری است نیز تحت عملیات آماده سازی نظیر خشک سازی^۱ قرار می گیرد تا انرژی موجود در واحد حجم آن افزایش یابد که در نتیجه آن، مراحل بعدی فرآیند نظیر خوراک دهی و گاز سازی آسان تر شده و هزینه حمل نقل آن نیز کاهش می یابد. در ادامه سه روش آماده سازی زیست توده شامل خشک سازی، آسیاب کردن و پیرولیز ارائه خواهد شد.

^۱Torrefaction

خشک سازی و خوراک دهی پنوماتیک

خشک سازی یک فرآیند حرارتی متعادل با دمایی بین ۳۰۰-۲۵۰ درجه سانتی‌گراد است که زیست‌توده جامد را تبدیل به ماده‌ای ترد و شکننده (زغال‌سنگ زیستی) می‌نماید که در ادامه فرآیند می‌تواند همچون زغال‌سنگ معمولی در فرآیند گاز سازی و فیشر- تروپش مورد استفاده قرار گیرد. همچنین ماده تولیدی دارای چگالی انرژی بالایی بوده و به راحتی به نقاط دوردست نیز فرستاده می‌شود. تبدیل چوب به زغال زیستی طی فرآیند ذکر شده دارای بازده انرژی ۹۵-۹۰ درصد خواهد بود و گرمای آزاد شده حین فرآیند نیز صرف سایر مصارف حرارتی واحد تولیدی می‌شود.

آسیاب کردن و خوراک دهی پیچشی

برای رسیدن به درصد تبدیل مناسب می‌بایست ذرات چوب در اندازه‌های ۱ میلی‌متری آسیاب شوند. در این صورت است که دیگر نیازی به مصرف انرژی اضافی برای تصفیه و بهبود خواص گاز سنتز تولیدی در مراحل بعدی نیست. در این حالت به واسطه ماهیت فیبری زیست‌توده دیگر نمی‌توان از سیستم‌های پنوماتیک استفاده نمود، در نتیجه از خوراک دهی پیچشی استفاده می‌شود.

پیرولیز

در این روش زیست‌توده بدون حضور هوا در دمای ۵۵۰-۳۵۰ درجه سانتی‌گراد تجزیه شده و تبدیل به یک ماده‌ای سیاه رنگ می‌گردد. بسته به زمان فرآیند پیرولیز دو زیرشاخه پیرولیز آهسته و پیرولیز سریع تعریف می‌شود.

در پیرولیز آهسته زیست‌توده با سرعت گرمایش کم ۷-۵ درجه سانتی‌گراد در دقیقه پیرولیز شده و مقدار زیادی گاز و زغال تولید می‌شود. گازهای تولید شده در دمای بالا (۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد) تحت فرآیند گاز سازی قرار گرفته و تبدیل به گاز سنتز می‌شوند. زغال تولید شده نیز خرد شده و در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد تحت فرآیند گاز سازی قرار می‌گیرد.

در پیرولیز سریع سرعت گرمایش حدود ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد در دقیقه است و محصول نهایی مایع به نام نفت زیستی^۱ تولید می‌شود. بازده این فرآیند تبدیل ۹۰ درصدی زیست‌توده به محصول مایع می‌باشد. این واکنش‌ها بیش‌تر در رآکتورهای بستر سیال انجام می‌شود.

مرحله گازسازی

در مرحله گازسازی کربن خوراک با استفاده از اکسیژن سوزانده شده و به مخلوط‌های گازی که عمدتاً شامل مونوکسید کربن، هیدروژن، دی‌اکسید کربن، نیتروژن، و متان است تبدیل می‌شود. بسته به نوع زیست‌توده مورد استفاده و ترکیب درصد عناصر موجود در آن بازده این مرحله متفاوت خواهد بود (جدول ۱).

^۱Bio-Oil

جدول ۱. ترکیب درصد عناصر موجود و درصد تبدیل کربن در گاز سنتز به دست آمده زیست توده‌های مختلف [۶]

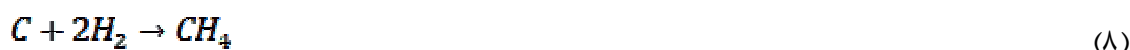
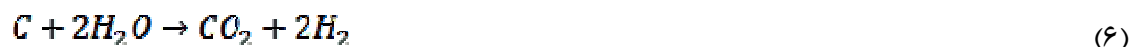
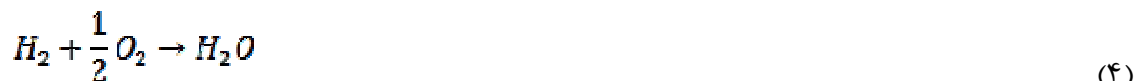
درصد تبدیل کربن	دانسیته (کیلوگرم بر مترمکعب)	ارزش حرارتی (مگا ژول بر کیلوگرم)	ترکیب درصد عناصر موجود				زیست توده
			اکسیژن	نیتروژن	هیدروژن	کربن	
۸۱	۱۱۱	۱۶/۲۹	۴۷/۱	۰/۴	۵/۸	۴۳/۸	تفاله چغندر قند
۷۲	۱۵۱	۱۴/۶۷	۴۵/۶	۰/۲	۵/۷	۴۷/۶	ضایعات نارگیل
۸۲/۳	۱۲۹	۱۶/۵۴	۴۶	۰	۵/۳	۴۱/۹	ساقه ذرت
۸۷	۱۰۹	۱۷/۴۸	۴۹/۵	۰/۱	۶	۴۲/۷	ضایعات پنبه
۸۲/۴	۲۵۹	۱۶/۷۸	۳۷/۹	۰/۴	۵	۳۶/۹	ساقه برنج
۷۰/۲	۲۵۹	۱۹/۷۸	۴۵/۱	۰	۵/۹	۴۸/۲	چوب
۵۶/۵	۲۲۲	۱۷/۹۹	۳۵/۸	۰/۱	۵/۴	۴۷/۵	ضایعات گندم

در حالت کلی دو روش ترموشیمیایی برای تولید گاز سنتز از زیست توده وجود دارد: روش اول در دمای بالا (دما بین ۱۲۰۰-۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد) و دیگری در دمای پایین تر و با حضور کاتالیزور آهن و یا نمک مذاب (دما بین ۱۰۰۰-۸۰۰ درجه سانتی‌گراد) صورت می‌گیرد. زیست توده به کار گرفته شده به روش اول به طور کامل تبدیل به گاز سنتز شده ولی در روش دوم تنها ۵۰ درصد تبدیل به گاز سنتز شده و باقی تبدیل به ترکیبات دیگری مانند متان و هیدروکربن‌های آروماتیک سنگین تر می‌شود که در مراحل بعدی می‌بایست از گاز سنتز جدا شوند [۷]. همچنین در دمای بالا، لایه‌ای به قطر یک سانتی‌متر با ویسکوزیته بالا از ترکیبات سنگین روی سطح مخزن گازساز تشکیل شده که آن را در مقابل خوردگی و فرسایش محافظت می‌کند [۸]. شکل کلی واکنش به صورت زیر است:



در اولین مرحله از فرآیند گازسازی، ترکیبات سلولز، همی سلولز و لیگنین در زیست توده به صورت ترموشیمیایی تجزیه شده و سپس زغال تولیدی از مرحله قبل تبدیل به گاز می‌شود. اما آنچه در واقع اتفاق می‌افتد زنجیره‌ای از واکنش‌های مختلف است که در نهایت منجر به تولید مونوکسید کربن و هیدروژن به‌عنوان محصول مورد نظر این مرحله خواهد شد [۶]:





ترکیب گاز حاصل از گازساز تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله مشخصات و رطوبت خوراک ورودی، شرایط دما و فشار فرآیند می‌باشد. پیش‌بینی ترکیب گاز حاصل از یک گازساز به خاطر نوع واکنش‌های پیچیده‌ای که در آن اتفاق می‌افتد کار بسیار مشکلی است. به طور کلی می‌توان از دو نوع گاز ساز بستر سیال با چرخش داخلی و یا گازساز بستر سیال کاتالیزوری در فرآیند فیشر- تروپش استفاده کرد که هر یک با توجه به نحوه عملکرد خود، گاز خروجی متفاوتی دارد.

گازساز بستر سیال با چرخش داخلی

از آنجایی که زیست‌توده شامل درصد بالایی خاکستر می‌باشد، این نوع رآکتور مناسب‌ترین حالت برای گازسازی در دمای بالا بدون حضور کاتالیزور می‌باشد. دمای این رآکتورها حدوداً دمای ۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد بوده که به طور مستقیم تولید گازهای هیدروژن و مونوکسید کربن برای فرآیند فیشر- تروپش می‌نماید. مشکل اصلی این نوع رآکتورها نیاز به کاهش سایز ذرات خوراک برای دستیابی به بازده مطلوب بوده که خود نیازمند صرف انرژی بالا برای خرد کردن یا آسیاب کردن زیست‌توده می‌باشد و این‌که در نهایت نمی‌توان توسط سیستم‌های پنوماتیک متداول آن‌ها را به رآکتور گاز ساز انتقال داد. بهترین راه برای آماده‌سازی زیست‌توده در این نوع رآکتورها پیرولیز یا خشک‌سازی زیست‌توده و تبدیل آن به فاز مایع بوده که باعث کاهش هزینه عملیاتی و حمل‌ونقل شده و در نهایت بازده فرآیند افزایش خواهد یافت. بسته به نوع فرآیند می‌توان از انواع گاز سازها استفاده کرد، اما کارآمدترین نوع گاز ساز بستر سیال می‌باشد.

گازساز بستر سیال کاتالیزوری

این رآکتور متداولترین شکل گازساز برای تبدیل زیست‌توده به گاز سنتز می‌باشد و در میان انواع مشابه رآکتورهای کاتالیزوری دارای کمترین ناخالصی بوده که باعث آسان‌سازی مراحل بعدی تصفیه خواهد شد. گاز سنتز تولیدشده در یک گازساز بستر سیال شامل هیدروژن، مونوکسید کربن، دی‌اکسید کربن، نیتروژن و آب به همراه مقادیر بالایی از سایر هیدروکربن‌ها نظیر متان، اتیلن، بنزن و قیر می‌باشد. هرچند این گاز برای فرآیندهای احتراق مناسب است، اما برای تولید فرآیند فیشر-تروپش مناسب نمی‌باشد. در نتیجه می‌بایست گاز خام تولیدی توسط کاتالیزور بازیابی شده و تبدیل به گاز هیدروژن و مونوکسید کربن (به همراه دی‌اکسید کربن و آب) شوند. از آنجایی که فرآیندهای تبدیل گاز سنتز به سوخت مایع بسیار به ناخالصی حساس هستند، بهتر است در مرحله گازساز به جای هوا از گاز اکسیژن خالص استفاده شود تا از حضور گاز نیتروژن جلوگیری به عمل آید. در غیر این صورت گاز سنتز تولیدشده حاوی ۴۰ درصد نیتروژن بوده که می‌بایست طی یک مرحله تصفیه اضافی جدا شود [۷].

تصفیه و آماده‌سازی گاز سنتز

حضور ناخالصی‌های جزئی (دوده، گوگرد، کلر و آمونیاک) در گاز سنتز اجتناب‌ناپذیر است. از آنجا که غلظت این اجزا معمولاً بیش از حد مجاز است، می‌بایست گاز سنتز شده را تصفیه نمود. اهمیت تصفیه گاز سنتز برای واحدهایی که از کاتالیزورهای گران‌قیمت استفاده می‌کنند، به دلیل حساسیت آن‌ها بیش‌تر خواهد بود. برای دستیابی به این هدف از فیلترهای کربن فعال و اکسید روی استفاده می‌شود. در فرآیند فیشر-تروپش نسبت مولی هیدروژن به مونوکسید کربن برابر با دو است. هنگامی که این نسبت گاز کم‌تر باشد، می‌توان آن را با واکنش انتقال آب - گاز^۱ تنظیم نمود. این مرحله جداگانه قبل از فرآیند فیشر-تروپش صورت می‌گیرد:



نکته زیست‌محیطی مرحله گازساز جلوگیری از انتشار دی‌اکسید کربن هر یک از مراحل بوده که در عین بالا بردن هزینه نهایی تولید سوخت یکی از ضوابط زیست‌محیطی این فرآیند می‌باشد. رویکرد کلی فرآیند پالایش گاز سنتز خام به صورت تماس گاز سنتز با آب، خنک‌سازی آن و حذف ترکیبات جامد (مانند گرد و غبار و دوده و خاکستر) و هالیدهای فرار می‌باشد. هنگام تولید گاز سنتز ترکیبات آمونیاک، هیدروژن سولفید، کربنید سولفید، دی‌سولفید کربن و هیدروژن سیانید نیز تشکیل می‌شود. آمونیاک به همراه هالیدها^۲ توسط دستگاه تصفیه آب - گاز حذف شده و هیدروژن سولفید توسط فرآیند جذب سطحی یا فرآیند کلاوس^۳ به ترکیبات ساده‌تر سولفور تجزیه شده و حذف می‌شود. روش جذب سطحی زمانی عملی است که میزان ترکیبات سولفور ناچیز باشد. در صورت بالا بودن میزان این ناخالصی‌ها، از نظر اقتصادی بهتر است

¹ WGS

² HCl, HBr, HF

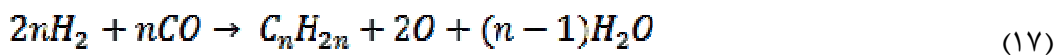
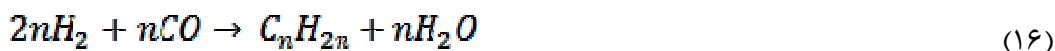
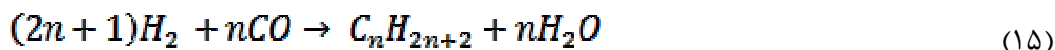
³ Claus

که مرحله تجزیه جداگانه‌ای برای حذف ترکیبات سولفور و آمونیاک در سیستم طراحی شود. حذف آمونیاک طی واکنش زیر صورت می‌گیرد [۶]:



فرآیند سنتز فیشر- تروپش

فرآیند تولید سوخت شامل استفاده از گازهای مونواکسید کربن و هیدروژن حاصل از گازسازی زیست‌توده و به دنبال آن اجرای فرآیند فیشر- تروپش و تولید هیدروکربن‌های مایع (C₁₀-C₁₉) به‌عنوان سوخت دیزل می‌باشد. در سنتز کاتالیزوری فیشر- تروپش یک مول مونواکسید کربن با دو مول هیدروژن، هیدروکربن‌های پارافینی با زنجیره مستقیم (C_xH_{2x}) همراه با مقادیر جزئی از هیدروکربن‌های شاخه‌دار و اشباع‌نشده (۲متیل پارافین و اولفین‌ها) و الکل‌های نوع اول را تشکیل می‌دهد. شرایط معمول عملیات برای سنتز فیشر- تروپش دمای ۲۰۰-۳۴۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۲۵-۶۰ بار می‌باشد، در واکنش گرمای فیشر- تروپش در حدود ۲۰٪ از انرژی شیمیایی به صورت گرما آزاد می‌شود. شکل کلی واکنش به صورت ذیل است [۸]:



کاتالیزور سنتز فیشر تروپش

برای بهبود شرایط عملیاتی واکنش و بالا بردن راندمان می‌توان از انواع مختلف کاتالیزور استفاده کرد؛ که مهم‌ترین آن‌ها کاتالیزورهای آهن (Fe) یا کبالت (Co) می‌باشد. مزیت اصلی کاتالیزور کبالت سرعت تبدیل بالاتر و طول عمر بیشتر (بیش از پنج سال) می‌باشد. به طور کلی این کاتالیزور برای واکنش هیدروژناسیون مناسب‌تر بوده و در مقایسه با کاتالیزور آهن کم‌تر تولید هیدروکربن اشباع‌نشده (اولفین‌ها) و الکل می‌کند. کاتالیزور آهن تحمل بالاتری در مقابل ترکیبات گوگرد داشته و ارزان‌تر است ولی تولید محصولات جانبی بیشتری می‌کند. طول عمر کاتالیزور آهن کوتاه بوده و در تأسیسات تجاری تنها به مدت محدود (هشت



هفته) قابل استفاده است. در صورت بهبود خواص کاتالیزورهای آهن می‌توان از آن‌ها برای تولید صنعتی سوخت مایع از زیست‌توده استفاده نمود و قیمت نهایی محصول را پایین آورد. فرآیند فیشر- تروپش مبتنی بر کاتالیزور آهن در صورت استفاده از واکنش انتقال آب-گاز بازده بالاتری بیش‌تری داشته و بهتر می‌توان نسبت مولی هیدروژن به مونوکسید کربن را تنظیم نمود. در مورد کاتالیزور کبالت می‌بایست این نسبت مولی، قبل از فرآیند اصلی در رآکتوری جداگانه تنظیم شود [۹].

توزیع محصول نهایی

واکنش فیشر- تروپش مانند پلیمریزاسیون به صورت رشد زنجیره‌ای هیدروکربن‌ها صورت می‌گیرد، شامل طیف وسیعی از محصولات می‌شود؛ هیدروکربن‌های سبک یک و دو کربنه، LPG (سه الی چهار کربنه)، نفتا (پنج الی یازده کربنه)، دیزل (دوازده الی بیست کربنه)، و موم (بیش‌تر از بیست کربنه) [۱۰]. توزیع نظری طول زنجیره را می‌توان با استفاده از معادله اندرسون شولتز فلوری^۱ تخمین زد:

$$\log \frac{W_n}{n} = n \times \log \alpha + \log \frac{(1-\alpha)^2}{\alpha} \quad (18)$$

در این رابطه W_n کسر وزنی یک محصول متشکل از n اتم کربن و α عامل احتمال رشد زنجیره می‌باشد. هر چه مقدار α بیش‌تر باشد محصولات با وزن مولکولی بالاتر تشکیل خواهد شد. مقدار α بستگی به مشخصات کاتالیزور به کار گرفته‌شده در فرآیند فیشر- تروپش دارد و با توجه به نیاز تولید یک محصول خاص و شرایط عملیاتی فرآیند می‌توان آن را به سمت تولید هیدروکربن‌های با وزن مولکولی مورد نظر هدایت کرد.

در عمل، اغلب درصدی انحراف از توزیع اندرسون شولتز فلوری ایده آل وجود دارد. بازده تولید هیدروکربن‌های یک کربنه (C_1) معمولاً بیش‌تر از مقدار پیش‌بینی شده است، درحالی‌که بازده C_2 (و همچنین C_3 و C_4) کم‌تر از مقدار پیش‌بینی شده است. برای تخمین مقدار واقعی W می‌توان از روابط ذیل استفاده کرد:

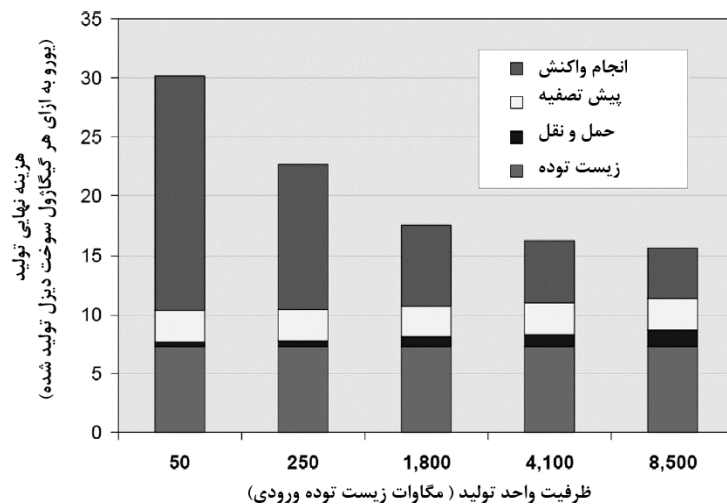
$$W_1 = \frac{1}{2} \times (1 - \sum_{i=5}^{\infty} W_i) \quad W_{2,3,4} = \frac{1}{6} \times (1 - \sum_{i=5}^{\infty} W_i) \quad (19)$$

بررسی اقتصادی تولید سوخت

هزینه‌های تولیدی شامل هزینه خوراک زیست‌توده، حمل‌ونقل خوراک اولیه، انبار و نگهداری، تصفیه خوراک، مرحله تبدیل (شامل گازسازی، خالص‌سازی گاز سنتز، فرآیند تروپش فیشر) می‌شود. هزینه بالای تأمین دما و فشار هر یک از مراحل فرآیند (تا دمای ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۶۰ بار) از طریق بالا

¹ Anderson-Schulz-Flory (ASF)

بردن ظرفیت فرآیند که منجر به افزایش راندمان و صرفه‌جویی اقتصادی بیشتر می‌شود جبران خواهد شد [۱۱]. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است با افزایش ظرفیت از ۵۰ به ۸۵۰۰ گیگا ژول هزینه تولید نصف می‌شود.



شکل ۳. تأثیر افزایش ظرفیت واحد تولیدی روی قیمت تمام‌شده سوخت [۱۲]

با توجه به راندمان ۵۶ درصدی تبدیل زیست‌توده به سوخت، برای تولید هر گیگا ژول سوخت نیاز به تأمین ۱/۸ گیگا ژول زیست‌توده اضافی خواهد بود [۱۳].

این مسئله نشان‌دهنده اهمیت طراحی فرآیندی با حداکثر بازده و حداقل اتلاف را نشان می‌دهد. برای کاهش هزینه تهیه خوراک زیست‌توده می‌توان واحد تولیدی را در نزدیکی محل تأمین خوراک احداث نمود تا از هزینه حمل‌ونقل آن کاسته شود که در این صورت هزینه تأمین ماده اولیه برابر ۲۰۰۰۰ ریال به ازای هر گیگا ژول زیست‌توده خواهد بود [۱۴].

هزینه‌های ثابت یک واحد تولید سوخت از زیست‌توده ۶۰ درصد بیش‌تر از تولید سوخت از زغال‌سنگ است. که این مسئله به خاطر نیاز به گاز ساز گران‌تر با قابلیت مهار ذرات جامد بیش‌تر و نیاز به واحد قوی‌تر خالص‌سازی گاز می‌باشد. مناسب‌ترین ظرفیت برای واحد تولید سوخت از زیست‌توده بین ۵۰۰-۱۰۰۰ مگاوات می‌باشد تا هزینه‌ها کاهش یابد. برای ظرفیت‌های تولید زیر ۲۰۰۰۰ بشکه در روز، هزینه‌های ثابت واحد تولیدی به شدت افزایش می‌یابد. قلب واحد تولیدی سوخت از زیست‌توده گاز ساز بستر سیال با چرخش داخلی اکسیژن (به جای هوا) بوده که دارای بیش‌ترین بازده در میان سیستم‌های گازساز می‌باشد. مناسب‌ترین حالت آماده‌سازی زیست‌توده، خشک‌سازی بوده که حمل‌ونقل را آسان‌تر کرده و باعث افزایش چگالی انرژی خوراک می‌شود. برای تولید اقتصادی‌تر سوخت می‌توان از ظرفیت بالاتر تولید استفاده نمود تا قیمت دیزل تولیدی از زیست‌توده با قیمت نفت بشکه‌ای ۵۰ دلار در بازار قابل رقابت باشد. برای بالا بردن ظرفیت واحدهای تولیدی می‌بایست میزان زیست‌توده تولیدی نیز بالا باشد که در حال حاضر مقدار

زیست توده موجود پاسخگوی تأمین نیاز در این زمینه نمی‌باشد و می‌بایست سیستم یکپارچه‌ای جهت جمع‌آوری و شناسایی منابع ممکن تشکیل شود.

جدول ۲ نشان‌دهنده مقایسه‌ای میان واحدهای تولیدی سوخت و تأثیر ترکیب آن‌ها روی قیمت نهایی و انتشار گازهای گلخانه‌ای است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در نهایت قیمت نهایی هر لیتر سوخت دیزل تولیدی به این روش بین ۲۳۰۰۰ تا ۴۰۰۰۰ ریال خواهد بود؛ البته این هزینه‌ها با ترکیب دو واحد تولید دیزل از زغال‌سنگ و زیست‌توده کاهش خواهد یافت که در نهایت منجر به کاهش انتشار گاز دی‌اکسید کربن به‌عنوان یک گاز گلخانه‌ای شده و از طرفی هزینه نهایی سیستم متعادل می‌شود؛ زیرا فرآیند تولید سوخت مایع از زغال‌سنگ در مقیاس صنعتی سال‌هاست که از نظر ملاحظات اقتصادی بهینه شده است. [۱۵]

جدول ۲. مقایسه میان واحدهای تولیدی سوخت و تأثیر ترکیب آن‌ها روی قیمت نهایی و انتشار گازهای گلخانه‌ای [۱۲]

واحد تولید سوخت از زغال‌سنگ و زیست توده		واحد تولید سوخت از زیست توده		واحد تولید سوخت از زغال‌سنگ		عامل
حذف CO ₂	آزادسازی CO ₂ تولیدی	حذف CO ₂	آزادسازی CO ₂ تولیدی	حذف CO ₂	آزادسازی CO ₂ تولیدی	
۲۷۵۰	۲۷۵۰	۳۵۸۰	۳۵۸۰	۲۴۳۰۰	۲۴۳۰۰	مقدار خوراک (تن در روز)
۴۹/۵	۵۱/۱	۵۰/۲	۵۱/۹	۴۷/۶	۴۹	بازده واحد تولیدی (درصد)
۵۷۴۰	۵۷۴۰	۲۵۵۰	۲۵۴۰	۲۸۷۰۰	۲۸۷۰۰	دیزل تولیدی (بشکه در روز)
۷۴	۹۷	۲۴	۳۴۰	۳۱۷	۴۲۷	توان تولیدی (مگاوات)
۱۱/۲	۲۶/۲	۲/۹۰	۲۵/۳۰	۱۱/۵	۲۵/۴	میزان کل CO ₂ آزاد شده (کیلوگرم بر گالن سوخت تولیدی)
۱۳۴۰۰۰	۱۳۲۰۰۰	۱۴۷۰۰۰	۱۴۴۰۰۰	۹۸۹۰۰	۹۷۶۰۰	مخارج واحد تولیدی (دلار در روز)

امکان‌سنجی تولید سوخت از زیست توده در ایران

۳۰ درصد مساحت ایران مستعد کشت محصولات کشاورزی است؛ اما به‌واسطه خشکسالی و عدم دسترسی به آب تنها نیمی از این مساحت به‌عنوان زمین‌های کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بر اساس مطالعات صورت گرفته ایران دارای پتانسیل تولید ۷۰۰ پتاژول انرژی از منابع زیستی است.

بر اساس تخمین وزارت جهاد کشاورزی از کل ۸۵ میلیون تن تولید محصولات کشاورزی، ۱۵/۳ میلیون تن آن را ضایعات تشکیل داده است که اغلب سوزانده می‌شود. این رقم در سال ۱۳۸۸ به ۳۳/۴ میلیون تن رسیده که در صورت مدیریت صحیح قابلیت تولید ۱۶۷ تراوات ساعت انرژی ناخالص در سال را داشته است.

حسینی و همکاران (۲۰۱۳) گزارش کرده اند که می توان حدود ۵ میلیارد لیتر بیواتانول را از ۱۸ میلیون تن ضایعات گندم، ملاس نیشکر، برنج، جو، ذرت، سیب زمینی، انگور، سیب تولید کرد [۱۶]. تولید ناخالص داخلی زیست توده در سال ۱۳۸۴ در حدود ۲۵/۴ Mtoe بوده که ۱/۱٪ از کل تولید ناخالص داخلی محسوب می شود [۱۷]، که از این مقدار نیز تنها ۰/۷ درصد از مصرف سالانه انرژی ایران را از منابع زیستی تامین می شود.

اگر ارزش میانگین هر کیلو محصول کشاورزی ۱۵۵ تومان باشد کل هزینه ضایعات بالغ بر ۲ هزار و ۳۷۱ میلیارد تومان خواهد شد. با توجه به سهم ۲۵ درصدی بخش کشاورزی از صادرات غیر نفتی و ارزآوری حدود ۲ میلیارد دلاری این بخش، در صورت حذف آن می توان زیان ناشی از آن را کاهش داد که خود بین ۳۵۰ تا ۴۰۰ میلیون دلار سودآوری خواهد داشت [۱۸]. البته با توجه به تغییر سیاست های یارانه ای، الگوی مصرف، اولویت های امنیت غذایی و تأمین و سلامت غذایی امری بعید به نظر می رسد. اما می توان از این ضایعات کشاورزی در جهت تولید محصولات باارزش تر استفاده نمود تا بلکه بخشی از ضرر ایجاد شده را برطرف نمود.

نتیجه گیری

تولید دیزل به روش فیشر- تروپش شامل چهار مرحله اصلی آماده سازی زیست توده، گاز سازی، تصفیه و آماده سازی گاز سنتز، فرآیند سنتز فیشر- تروپش می باشد. واکنش فیشر- تروپش مانند پلیمریزاسیون به صورت رشد زنجیره ای هیدروکربن ها صورت می گیرد (محصول: هیدروکربن های سبک یک و دو کربنه، LPG، نفتا، دیزل و موم). چالش اصلی فرآیند، هزینه محصول نهایی است که می توان آن را از طریق بالا بردن ظرفیت تولید جبران نمود، مناسب ترین ظرفیت برای واحد تولید سوخت از زیست توده بین ۱۰۰۰ - ۵۰۰ مگاوات می باشد تا هزینه ها کاهش یافته و قیمت دیزل تولیدی از زیست توده با قیمت نفت بشکه ای ۵۰ دلار در بازار قابل رقابت باشد. بیشترین بازده در میان سیستم های گازساز مربوط به گاز ساز بستر سیال با چرخش داخلی بوده و مناسب ترین حالت آماده سازی زیست توده، خشک سازی است که باعث آسان تر شدن حمل و نقل و افزایش چگالی انرژی خوراک می شود. ایران دارای پتانسیل تولید ۷۰۰ پتاژول انرژی از منابع زیستی است اما در حال حاضر تنها ۰/۷ درصد از مصرف سالانه انرژی از منابع زیستی تامین می شود. با توجه به میزان تولید ضایعات کشاورزی در ایران، در صورت تولید سوخت از این منبع مهم، کشور شاهد ۳۵۰ تا ۴۰۰ میلیون دلار سودآوری اقتصادی در سال خواهد بود.

منابع

- [1] F. Birol, World energy outlook 2013, International Energy Agency, 2013.
- [2] J.W. Lee, Advanced Biofuels and Bioproducts, Springer, 2013.
- [3] Z. Luo, S. Wang, Y. Liao, J. Zhou, Y. Gu, K. Cen, Research on biomass fast pyrolysis for liquid fuel, Biomass and Bioenergy, Vol. 26, 2004, pp 455-462,.



- [4] M.J. Metzger, B.J. Glasser, B. Patel, J. Fox, B.C. Sempuga, D. Hildebrandt, D. Glasser, Liquid Fuels from Alternative Carbon Sources Minimizing Carbon Dioxide Emissions, *AICHE Journal*, Vol. 59, 2013, pp2062-2078.
- [5] R. Zwart, R. van Ree, Bio-based Fischer–Tropsch Diesel Production Technologies, in: *Biofuels*, John Wiley & Sons, Ltd , 2009, pp. 95-116.
- [6] J. Hu, F. Yu, Y. Lu, Application of Fischer–Tropsch Synthesis in Biomass to Liquid Conversion, *Catalysts*, Vol. 2, 2012, pp 303-326.
- [7] E. van Steen, M. Claeys, Fischer-Tropsch Catalysts for the Biomass-to-Liquid (BTL)-Process, *Chemical Engineering & Technology*, Vol. 31, 2008, pp655-666.
- [8] V. Meshcheryakov, V. Kirillov, Analyzing Biomass Conversion into Liquid Hydrocarbons, *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, Vol. 36, 2002, pp 466-471.
- [9] M. Lualdi, Fischer-Tropsch Synthesis over Cobalt-based Catalysts for BTL Applications. 2012.
- [10] A. Vogel, F. Mueller-Langer, M. Kaltschmitt, Analysis and Evaluation of Technical and Economic Potentials of BtL-Fuels, *Chemical engineering & technology*, Vol. 31, 2008, pp 755-764.
- [11] F. Trippe, M. Fröhling, F. Schultmann, R. Stahl, E. Henrich, Techno-Economic Analysis of Fast Pyrolysis as a Process Step Within Biomass-to-Liquid Fuel Production, *Waste Biomass Valor*, Vol. 1, 2010, pp 415-430.
- [12] J.R. Katzer, Coal and Biomass to Liquid Fuels, in: *Global Climate Change-The Technology Challenge*, Springer, 2011, pp. 89-128.
- [13] H. Boerrigter, Economy of Biomass-to-Liquids (BTL) plants, *Energy Research Centre of the Netherlands (ECN)*, 2006.
- [14] R.W. Zwart, H. Boerrigter, High efficiency co-production of synthetic natural gas (SNG) and Fischer-Tropsch (FT) transportation fuels from biomass, *Energy & fuels*, 19, 591-597 2005.
- [15] A. I. P. Magalhães, D. Petrovic, A. L. Rodriguez, Z. A. Putra, and G. Thielemans, In the Field Techno-economic assessment of biomass pre-conversion of biomass-to-liquids line-up, 2009.
- [16] Hosseini, S. E., Andwari, A. M., Wahid, M. A., & Bagheri, G., A review on green energy potentials in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 27, 2013, pp 533-545.
- [۱۷]. پازوکی، محمد؛ چشم انداز زیست انرژی در ایران و جهان، *مجله مهندسی شیمی ایران*، سال ۹، شماره ۵۱ آبان ۸۹
- [۱۸]. شادان، عبدالرحمن؛ بررسی ابعاد اقتصادی ضایعات محصولات کشاورزی در ایران، *ششمین کنفرانس اقتصاد کشاورزی*، ۸ و ۹ آبان ۱۳۸۶